

清华大学教材

张三慧 主编

工科大学物理学

第二册

电 磁 学

张三慧 藏庚媛 华基美 编

北京科学技术出版社

清华大学教材

张三慧 主 编

工 科 大 学 物 理 学

第 二 册

电 磁 学

张三慧 臧庚媛 华基美 编

北京科学技术出版社

内 容 简 介

本书是清华大学教材《工科大学物理学》第二册，讲述了各类工科学生所需的物理学基础理论的电磁学部分，包括静止和运动电荷的电场，电荷和电流的磁场，介质中的电场和磁场，电磁感应，电磁波等。讲述特点是利用狭义相对论来阐述磁场和电场的联系。内容力求系统化和现代化。除了基本内容外，还专题介绍了大气电学、超导、等离子体等今日物理趣闻与技术和著名科学家传略，以扩大学生的知识领域。

本书可作为各类工科大学及专科学校的物理学教科书，也可作为其他高校师生及中学物理教师教学和自学参考书。

《工科大学物理学》

第二册《电磁学》

张三慧 主编

张三慧 戚庚媛 华基美 编

北京科学技术出版社出版

(北京西直门外南路19号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

固安县印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 12.125印张 308千字

1987年12月第一版 1989年7月第二次印刷

印数8601—11600册

ISBN7-5304-0022-3/Z·17 定价 4.50 元

前 言

摆在你面前的这部《工科大学物理学》是编者近十年来在清华大学讲授物理学所用的讲义的基础上编写的。

物理学是工科大学生必修的基础理论课。随着工业技术和物理科学本身的发展（这种发展在近几十年里更加快了步伐），物理学内容和讲授方法应该有相应的革新。但是，在我国，近几十年来的物理教学，特别是反映在物理教材上，并没有适应这种时代的变化。这主要表现在：1. 内容一如既往，基本未变，近代物理的基本概念与方法没有得到恰如其份地反映。2. 讲述方法基本未变，某些重要物理现象与规律相对孤立，没有反映出近代物理对自然规律的深刻的和系统化的理解。3. 与目前我国中学物理教学衔接不好。不少内容是简单重复。这就破坏了学生学习物理学的兴趣，妨碍了他们学习积极性的发挥。

针对这些我们认为的缺点，在本书的编写上力求体现以下的特点。

首先是起点较高。凡是中学教学大纲已列的内容，我们都认为学生已基本掌握。除了为本书的讲授系统所需要的以外，一般不再做简单的重复。

其次是着重加强了讲述的系统性。陈述物理学的内容可以按照两种系统进行。一种是遵循历史发展的顺序——历史逻辑，从早到晚依次讲述。一种是遵循物理学规律自身的相互联系所确定的顺序——结构逻辑或教学逻辑，从最基本的规律逐渐展开。虽然在不少地方这两种系统是一致的，但二者确有明显的不同。为了使工科大学生在较少的学时内对现代物理学的内容有一个尽可能整体的理解，

我们在本书中采用了后一种讲述系统。

力学部分当然是以牛顿定律为基础展开的。书中着重阐明了守恒定律。作为牛顿力学的发展，最后讲了狭义相对论。

电磁学部分以库仑定律或高斯定律、电荷不变性以及狭义相对论为基础，讲述了静电场、运动电荷的电场以及磁场的规律。这样就更深刻地阐明了电场和磁场的相互联系。相对论不再只作为知识介绍，而是作为理解和阐述物理现象本质的基本规律了。

热学部分可以说是以统计概念和统计规律为基础加以讲述的。分子运动论当然是这样。对热力学第一定律书中也阐明了其微观意义。对热力学第二定律更是突出了它的统计意义。熵的概念是从统计的角度引入的。

振动与波部分是牛顿力学的延伸。物理光学实际上是作为波的基本规律在电磁波现象中的应用而讲述的。在量子物理部分我们也大胆地采用了演绎的讲述系统。这样可以使学生更深刻地掌握微观世界的基本特征——二象性和量子性。

第三是尽可能使内容现代化。书中着重介绍了近代物理的观点，例如，守恒定律与对称性的关系，相对论的时空观，原子观点，统计的观点，微观粒子的二象性和量子性等。关于近代物理知识包括物理学前沿的介绍，除了散见于各章的实例、例题或习题外，本书特辟了两类特殊的章节：一是“今日物理趣闻”，一是“物理学与技术”。前者着重介绍当今物理学前沿的发展，例如，粒子理论、广义相对论、超导、等离子体、大爆炸、耗散结构理论等。后者着重介绍物理学的近代应用，例如同步卫星的发射、等离子体发电、热泵、扫描隧穿显微镜等。根据工科教学计划限定的时间，这些内容是不可能作为教学要求进行课堂讲授的。但是，我们热切地希望所有的工科学生都能在课余阅读这些材料（为此，我们已在写法上尽可能地通俗化了，相信他们都是能看懂的）。这对于提高他们学习物理的兴趣、扩大他们的视野以及在各自的专业范围内开

拓自己的思路一定会有帮助的。

本书还辟了“科学家介绍”这一栏目。简要地介绍了重要的物理学家的生平与贡献。这样做，一方面是为了向学生提供必要的物理学史知识，另一方面也希望学生能从这些科学家的开创精神、治学态度以及思想境界方面获得教益。

关于习题，我们并不赞同那种越多越好的观点，考虑到工科大学生的全面发展以及理解和掌握物理基本概念和规律的需要，本书中只编选了比在规定学时内能完成的稍多的思考题和习题。我们希望大学生在做题时不要贪多，而要求精。要真正把做过的每一道题从概念原理上彻底弄清楚，并且用尽可能简洁明确的语言、公式、图象表述出来。

本书每章都列有“本章要求”和“本章提要”。我们希望通过这些来发挥学生学习的主动性和帮助他们进行自我检查。

本书在清华大学各系使用的过程中，是在规定的120学时（每学时60分钟）内全部授完的（其中包括10—15学时的习题讨论课）。讲课有粗有细，有些属于要求的章节也未在课堂上讲而是留给学生自学。学生中的大多数都是怀着很大的兴趣阅读这部教材的，也都取得了较好的学习成绩。

本书也吸收了本校物理系其他物理教师的宝贵经验。在编写和试用过程中，王以炳、高炳坤、陈惟蓉等各位老师曾提出过许多宝贵的意见。刘凤英老师参加了本书核算习题答案的工作。本校建筑系程远老师为本书绘制了全部科学家的肖像。郭奕玲老师提供了部分物理学史资料。对于以上这些热情的帮助，我们表示衷心的感谢。

在本书的编写（以及以往的教学）过程中，我们还借鉴了国外的许多教材，特别是帕塞尔的《电磁学》（E.M.Purcell, Electricity and Magnetism）和奥哈尼安的《物理学》（H.C.Ohanian, Physics）。对这两本书的作者，我们也谨致以谢意。

我等有志于物理教学的改革久矣。然而鲜有成效。仅以此书献给广大的物理教师和工科大学生。我们热切地盼望着他们对本书的各方面的批评。

编者 1987 年 5 月

数值表

真空中的光速

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

基本电荷

$$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

电子的荷质比

$$e/m_e = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

库仑定律恒量

$$k = 1/4\pi\epsilon_0 = 8.99 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

真空介电常数

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

真空磁导率

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

玻尔半径

$$a_0 = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$$

玻尔磁子

$$\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

电子磁矩

$$\mu_e = 9.28 \times 10^{-24} \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

质子磁矩

$$\mu_p = 1.41 \times 10^{-26} \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

核磁子

$$\mu_N = 5.05 \times 10^{-27} \text{ A}\cdot\text{m}^2$$

太阳辐射总功率

$$P_0 = 4.2 \times 10^{26} \text{ W}$$

太阳辐射功率

$$M = 6.9 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$
 $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = q/\epsilon_0$
 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$
 $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = q/\epsilon_0$

目 录

第一章 静止电荷的电场	1
§1.1 电荷	1
§1.2 库仑定律	5
§1.3 电场和电场强度	9
§1.4 点电荷的电场及其叠加	11
§1.5 电力线和电通量	19
§1.6 高斯定律	23
§1.7 利用高斯定律求静电场的分布	26
思考题	35
习题	36
*第二章 运动电荷的电场	39
§2.1 高斯定律与运动电荷	39
§2.2 电场的变换	41
§2.3 匀速直线运动的点电荷的电场	46
§2.4 静电场对运动电荷的作用	51
习题	54
第三章 电势	55
§3.1 静电场的保守性	55
§3.2 电势差和电势	58
§3.3 电势叠加原理	63

§3.4 电势梯度.....	68
§3.5 电荷在外电场中的静电势能.....	71
*§3.6 电荷系的静电能.....	74
思考题.....	80
习题.....	81
今日物理趣闻 A. 大气电学.....	86
第四章 静电场中的导体.....	97
§4.1 导体的静电平衡条件.....	97
§4.2 静电平衡的导体上的电荷分布.....	99
§4.3 有导体存在时静电场的分析与计算.....	102
§4.4 静电屏蔽.....	106
物理学与技术 I 范德格拉夫静电加速器.....	109
思考题.....	112
习题.....	113
第五章 静电场中的电介质.....	115
§5.1 电介质对电场的影响.....	115
§5.2 电介质的极化.....	117
§5.3 有电介质存在时的静电场的分析和计算.....	122
§5.4 电容器和它的电容.....	129
§5.5 电容器的能量和电场的能量.....	134
物理学与技术 II 压电效应及其应用.....	140
思考题.....	143
习题.....	145
第六章 稳恒电流.....	148
§6.1 电流和 <u>电流密度</u>	148

§6.2 稳恒电流	151
§6.3 欧姆定律和电阻	153
§6.4 电动势	157
§6.5 有电动势的电路	160
§6.6 电容器的充电与放电	164
§6.7 电流的一种典型微观图象	167
物理学与技术 III 常用电源	173
思考题	180
习题	181
 第七章 磁力	 184
§7.1 磁力 <i>长吉书·俄国·图·知识·</i> <i>国·东·中·万·20·8</i>	184
§7.2 磁场与磁感应强度 <i>44·白·空·派·平·集·某·只·介·特·普·用·H</i>	187
§7.3 带电粒子在磁场中的运动	191
§7.4 载流导线在磁场中受的力	194
§7.5 霍尔效应	199
*§7.6 磁场是哪里来的?	201
物理学与技术 IV 磁流体发电	210
思考题	213
习题	214
今日物理趣闻 B. 等离子体	217
 第八章 磁场	 233
*§8.1 匀速运动点电荷的磁场	233
§8.2 毕奥—萨伐定律	236
§8.3 安培环路定理	243
§8.4 利用安培环路定理求磁场分布	246
§8.5 变化电场产生磁场	250

§8.6 平行电流间的相互作用力	255
思考题	259
习题	260
第九章 磁场中的磁介质	265
§9.1 磁介质对磁场的影响	265
§9.2 磁介质的磁化	267
§9.3 有磁介质存在时磁场的分析和计算	271
§9.4 铁磁质	276
§9.5 简单磁路	280
物理学与技术 V 磁记录	283
思考题	285
习题	287
第十章 电磁感应	290
§10.1 法拉第电磁感应定律	290
§10.2 动生电动势	293
§10.3 感生电动势和感应电场	298
§10.4 互感	301
§10.5 自感	303
§10.6 磁场的能量	307
科学家介绍 法拉第	312
思考题	316
习题	318
今日物理趣闻 C. 超导电性	321
第十一章 麦克斯韦方程组和电磁辐射	337
§11.1 麦克斯韦方程组	337

*§11.2 加速电荷的电场.....	339
*§11.3 加速电荷的磁场.....	343
*§11.4 电磁波的能量.....	345
*§11.5 电磁波的动量.....	350
科学家介绍 麦克斯韦	355
习题	359
附录 磁单极	360
习题答案	363

第一章 静止电荷的电场

本章要求

1. 理解电荷守恒和电荷的相对论不变性的意义。
2. 理解库仑定律和电力叠加原理的意义。
3. 理解电场的概念、电场强度的定义和电场叠加原理的意义。
4. 能用点电荷电场的叠加法计算简单电荷分布的电场。
5. 理解电通量的概念和高斯定律的意义以及它与库仑定律的关系。
6. 掌握用高斯定律求解有特定对称性的电荷分布的电场的方法，特别是带电的球、线、板的电场。
7. 能计算静电场对静止的电荷的作用力。

§ 1.1 电 荷

很早以前，人们就认识到有些物体，如琥珀和丝绒相互摩擦后，可以具有吸引轻小物体的能力，即所谓“琥珀掇芥”。后来把这种能力归因于经过摩擦的物体带上了电荷。通过对电荷（包括静止的和运动的电荷）的各种相互作用和效应的研究，人们现在认识到电荷的基本性质有以下几方面：

1. 电荷有两种，同种电荷相斥，异种电荷相吸。美国物理学家富兰克林（Benjamin Franklin 1706—1790）首先以正电荷、负电荷的名称来区分两种电荷，这种命名法一直延续到现在。宏观带电体所带电荷种类的不同根源于组成它们的微观粒子所带电荷种

类的不同。电子、反质子等带负电荷；质子、正电子等带正电荷。

带电体所带电荷的多少叫电量。谈到电量，就涉及如何测量它的问题。一个电荷的量值大小只能通过该电荷所产生的效应来测量，这一点以后会讲到的，现在我们先假定电量的计量方法已有了。电量常用 Q 或 q 表示，在国际单位制 (SI) 中，它的单位为库仑，简记作 C。

2. 电荷的量子性

实验证明，在自然界中，电荷总是以一个基本单元的整数倍出现的。电荷的这个特性叫做电荷的量子性。电荷的基本单元就是一个电子所带电量的绝对值，常以 e 表示。经测定

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$$

电荷具有基本单元的概念最初是根据电解现象中通过溶液的电量 and 析出物质的质量之间的关系提出的。法拉第 (Michael Faraday 1791—1867)、阿累尼乌斯 (Arrhenius 1859—1927) 等都为此做过重要贡献。他们的结论是：一个离子的电量只能是一个基元电荷的电量的整数倍。直到 1890 年斯通尼 (John Stone Stoney 1826—1911) 才引入“电子” (Electron) 这一名称来表示带有负的基元电荷的粒子。其后，1913 年密立根 (Robert Anolvews Millikan 1868—1953) 设计了有名的油滴试验，直接测定了此基元电荷的量值。现在已经知道许多基本粒子都带有正的或负的基元电荷。例如，一个正电子，一个质子都各带有一个正的基元电荷。一个反质子，一个负介子则带有一个负的基元电荷。微观粒子所带的基元电荷数常叫做它们各自的电荷数，都是正整数或负整数。近代物理从理论上预言基本粒子由若干种夸克或反夸克组成，每一个夸克或反夸克可能带有 $\pm \frac{1}{3}e$ 或 $\pm \frac{2}{3}e$ 的电量。然而至今单独存在的夸克尚未在实验中发现。

本章大部分章节讨论电磁现象的宏观规律，所涉及的电荷常常是基元电荷的许许多多倍。在这种情况下，我们将只从平均效果上

考虑，认为电荷连续地分布在带电体上，而忽略电荷的量子性所引起的微观起伏。尽管如此，在阐明某些宏观现象的微观本质时，我们还是要从电荷的量子性出发的。

在以后的讨论中我们经常用到点电荷这一概念。当一个带电体本身的线度比我们所研究的问题中所涉及的距离小很多时，该带电体的形状与电荷在其上的分布状况均无关紧要，该带电体就可看作一个带电的点，叫点电荷。由此可见，点电荷是个相对的概念。至于带电体的线度比问题所涉及的距离小多少时，它才能被当作点电荷，这要依问题所要求的精度而定。当在宏观意义上谈论电子，质子等带电粒子时，完全可以把它们视为点电荷。

3. 电荷守恒

实验指出，对于一个系统，如果没有净电荷出入其边界，则该系统的正、负电荷的电量的代数和将保持不变，这就是电荷守恒定律。宏观物体的带电、电中和以及物体内的电流等现象实质上是由于微观带电粒子在物体内部运动的结果。因此，电荷守恒实际上也就是在各种变化中，系统内粒子的总电荷数守恒。

近代物理实验已表明，在某些核反应和微观粒子的相互作用过程中，电荷是可以产生和消失的。然而电荷守恒并未因此而遭到破坏。例如，一个高能光子与一个重原子核作用时，该光子可以转化为一个正电子和一个负电子（这叫电子对的“产生”）而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇，又会同时消失而产生两个或三个光子（这叫电子对的“湮灭”）。在已观察到的各种过程中，正、负电荷总是成对出现或成对消失。由于光子不带电，正、负电子又各带有等量异号电荷，所以这种电荷的产生和消失并不改变系统中的电荷数的代数和，因而电荷守恒定律仍然保持正确。

4. 电荷的相对论不变性

实验证明，一个电荷的电量与它的运动状态无关。较为直接的实验例子是比较氢分子和氮原子的电中性。氢分子和氮原子都有两

电子作为核外电子，这些电子的运动状态相差不大。氢分子还有两个质子，它们是作为两个原子核在保持相对距离约为 $0.7\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) 的情况下转动的 (图 1.1)。氢原子中也有两个质子，但它们组成一个原子核，两个质子紧密地束缚在一起运动 (图 1.2)。氢原子中两个质子的能量比氢分子中两个质子的能量大得多 (一百

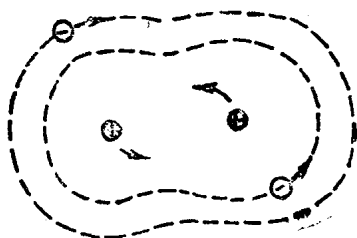


图 1.1 氢分子结构示意图

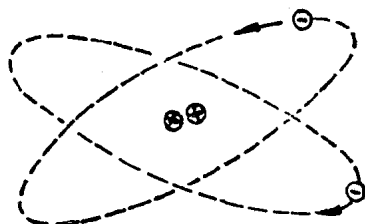


图 1.2 氢原子结构示意图

万倍的数量级)，因而两者的运动状态有显著的差别。如果电荷的电量与运动状态有关，氢分子中质子的电量就应该和氢原子中质子的电量不同，但两者的电子的电量是相同的，因此，两者就不可能都是电中性的。但是实验证实，氢分子和氢原子都精确地是电中性的，它们内部正、负电荷在数量上相差小于 10^{20} 分之一。这就说明，质子的电量是与其运动状态无关的。

还有其它实验，也证明电荷的电量与其运动状态无关。另外，根据这一结论导出的大量结果都与实验结果相符合，这也反过来证明了这一结论的正确性。

由于在不同的参照系中观察，同一个电荷的运动状态不同，所以电荷的电量与其运动状态无关，也可以说成是，在不同的参照系内观察，同一带电粒子的电量不变。电荷的这一特性叫电荷的相对论不变性。